

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.04.009

混合储备模式下洪涝灾害应急物资配置结构优化

王伟¹,张泰山¹,陈志松²,黄莉³,宋月¹,严孜³

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏南京 210098; 2. 南京师范大学商学院,江苏南京 210023;
3. 河海大学公共管理学院,江苏南京 211100)

摘要: 为了提升洪涝灾害应急响应能力,提出应急物资三主体混合储备模式,根据三主体供应特点和物资需求条件,构建了以最小政府成本和最低灾害损失为目标,以保障能力、政府成本及企业利润为约束的洪涝灾害应急物资配置模型,并通过模型的求解及简化,确定了不同储备模式的适用范围。在对以块石为代表的洪涝灾害应急物资算例计算的基础上,分析比较了不同储备模式下的最优配置结构,并针对与政府决策相关的重要参数进行了敏感度分析,结果表明,对于以块石为代表的洪涝灾害应急物资,建议采用以政府直接储备为主、委托企业储备为辅、社会力量代为储备为补充的储备模式,物资的现货市场采购成本会影响物资储备总量,政府储备库采购储备成本、企业期权价格会影响物资配置结构。

关键词: 洪涝灾害;应急管理;混合储备;储备模式;结构优化

中图分类号: F251.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)04-0066-08

Optimization of allocation structure of flood emergency materials under mixed reserve mode

WANG Wei¹, ZHANG Taishan¹, CHEN Zhisong², HUANG Li³, SONG Yue¹, YAN Zi³

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Business School, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;
3. School of Public Administration, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to improve the emergency response ability of flood disasters, a three-agent mixed reserve model of emergency materials is put forward in this paper. Based on the analysis of the supply of the three-agent reserves and the demand of materials, a materials reserve distribution model is established, which aims at the minimum government cost and the lowest disaster loss. The allocation model of materials reserves is restricted by the guarantee capacity of each subject, government cost and enterprise profit. Through the simplification of the model, the applicable scope of different reserve modes is determined. Based on the calculation of the examples of flood emergency materials represented by block stone, the optimal allocation structure under different reserve modes is analyzed and compared, and the sensitivity analysis is carried out for the important parameters related to government decision-making. The conclusions are as follows: for the flood emergency materials represented by block stone, it is suggested that the reserve mode should be based on the direct reserve of the government, supplemented by the reserve of enterprises, and supplemented by the reserve of social forces; the purchase cost of materials in the spot market will affect the total amount of material reserves, thus the purchase and reserve cost of government reserve and the price of enterprise option will affect the material reserve structure.

Key words: flood disaster; emergency management; mixed reserve; reserve mode; structure optimization

洪涝灾害在我国频繁发生,严重威胁着人们的生命健康和财产安全。如 2021 年河南、陕西、山西等地严重的洪涝灾害造成了重大的损失^[1]。研究如何提升洪涝灾害应急能力对社会进步与发展具有重要意义。

进行洪涝灾害应急物资储备,是洪涝灾害应急管理工作的前提和物质基础。洪涝灾害应急物资储备是指政府为应对各类洪涝灾害,事先采取多种方式对各种保障性物资进行采购和储备^[2-3]。洪涝灾害应急物资

基金项目: 江苏省水利科技计划(2020071,2020023);江苏省政府引导性计划(软科学研究)(BR2020090);国家自然科学基金面上项目(71974052);国家重点研发计划(2021YFC3001002)

作者简介: 王伟(1979—),男,教授,博士,主要从事水利工程和应急物流研究。E-mail:13813826667@163.com

引用本文: 王伟,张泰山,陈志松,等.混合储备模式下洪涝灾害应急物资配置结构优化[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):66-73.
WANG Wei, ZHANG Taishan, CHEN Zhisong, et al. Optimization of allocation structure of flood emergency materials under mixed reserve mode [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(4): 66-73.

储备研究属于应急物资储备研究的一类^[4-5]。应急物资储备研究的主要目标是应急物资可靠供应、政府成本最小化、灾害损失最小化^[6-8]。在物资储备量的选择上,政府常常面临两难的困境^[9-10]:储备量过少,会发生物资紧缺问题,然灾害发生的频率较低;若储备量过多,在没有灾害发生的情况下会产生很大的财政负担,并可能造成浪费。很多研究者采用混合储备模式来解决这个问题^[11-12]。混合储备模式下,政府以实物储备一部分物资,同时委托企业以实物或生产能力形式储备一部分物资,并对企业采取适当的激励措施。为了解决政府与合作方的调运次序问题,引入报童模型^[13-14],政府物资储备处于首位,实物储备企业和生产能力储备企业次之。虽然多方参与可以减少政府花费,但是效果不够明显,且合作企业往往为了自身利益没有达到实际储备要求。为此,很多研究者采用期权合同的方式^[15-17],政府在灾害发生前仅支付一部分金额,当灾害发生后,才支付实际使用物资的剩余一部分金额,这样既减轻了政府的财政压力,也增加了企业提供物资的积极性。

综上,虽然近几年对混合储备模式有很多研究,但是大多只考虑一家企业与政府合作的情况,且很少考虑灾害损失。针对以上问题,本文考虑了政府储备库储备、企业实物储备、企业生产能力储备 3 种物资储备主体,并针对这 3 种物资储备主体确定了特定的储备成本,进而建立混合储备模式下的洪涝灾害应急物资配置模型,确定了不同储备模式的适用范围,实现了物资最优配置结构的精确计算。

1 模型建立与求解

洪涝灾害应急物资储备模式包括政府或相关机构直接储备(直储),政府委托企业储备(委储)和社会力量帮助政府机构代为储备(代储)这 3 种不同的储备模式。其中,直储为政府储备库储备,委储包括企业实物储备和企业生产能力储备两种方式。而代储包括紧急采购、强制征用和社会捐赠 3 种方式,因代储中强制征用和社会捐赠两种方式有很大的不稳定性,当物资储备不满足需求时,仅考虑紧急采购方式^[11]。

1.1 模型设定

政府为方便管理,将管辖区域划分为多个地区。由于政府在洪涝灾害应急物资储备中处于优势地位,企业合作意愿往往很强,故仅将企业利润作为一个约束加到模型中。此外,做出如下假设。

a. 灾害发生概率:灾害的发生具有不确定性,在不同的地区,灾害可能发生多次,政府提供的灾害发生情况说明往往会过于复杂,大大增加了模型的计算难度,为此,将一个时期的灾害整合为一次,并且都是一次性解决的,这不会影响模型本身的普遍适用性。通过历史数据和当前情况,政府可以提供相关的灾害数据。

b. 物资储备策略:考虑政府储备库储备、企业实物储备、企业生产能力储备三类物资储备主体。灾害发生前,为了避免储备主体过多导致管理混乱,每个地区每类储备主体至多选择一个。假设政府只能向企业采购,而不使用强制征用手段。灾害发生后,采用政府储备库-实物储备企业-生产能力储备企业的顺序调用物资,剩余需求全部从现货市场上购买。在应急物资配置模型中,企业实物储备、企业生产能力储备均采用期权合同的方式,假设这两者期权预留价格企业实物储备更高,而期权执行价格相反。

c. 物资的获取与持有:假设政府储备和供应商储备的成本结构、收益函数是公共知识。在应急物资配置模型中,物资获取方式因储备主体不同而不同,政府通过采购获取,实物储备企业通过生产获取,而生产能力储备企业在灾害发生之后才通过生产获取。为了简化计算,不考虑灾害发生的时间因素^[18],仅以最大库存量来计算物资的持有成本。

d. 合同期限:假设合同期限与物资保质期相同,这是为了确保合同期限问题是单周期的^[11]。周期结束后,政府储备库与实物储备企业将未使用物资以残值形式出售。假设政府和企业的单位剩余物资残值相同且小于单位物资最小获取成本。

e. 政府其他收益与灾害损失:政府储备物资的收入往往是以社会效益为主,因其难于具体计算,故本文仅考虑政府经济成本。假设模型的物资保证率与物资实际储备数量和定额规定水平有关,与配送距离、配送时间等无关。在灾害发生后,物资储备量能否满足物资需求会影响灾害的损失程度。

1.2 模型建立

1.2.1 目标函数

目标函数表示如下:

$$\begin{aligned} \min C = & \sum_r c_{ir} Q_{ir} + \sum_r (o_{jr} Q_{jr} - p \varepsilon \omega_{jr} Q_{jr}) + \sum_r (o_{kr} Q_{kr} - p \varepsilon \omega_{kr} Q_{kr}) - \\ & v E \sum_r (Q_{ir} - \xi_r)^+ + E \sum_r e_{jr} \min[(\xi_r - Q_{ir})^+, Q_{jr}] + \\ & E \sum_r e_{kr} \min[(\xi_r - Q_{ir} - Q_{jr})^+, Q_{kr}] + E \sum_r c_r (\xi_r - Q_{ir} - Q_{jr} - Q_{kr})^+ \end{aligned} \quad (1)$$

$$\min D = E \sum_r [\delta_1 \min(Q_{ir} + Q_{jr} + Q_{kr}, \xi_r) + \delta_2 (\xi_r - Q_{ir} - Q_{jr} - Q_{kr})^+] \quad (2)$$

式中: C 为政府花费; R 为地区的集合, 以 r 索引; ξ_r 为灾害发生后地区 r 物资的需求量, 其概率密度和累计分布密度分别为 $f(\xi_r)$ 和 $F(\xi_r)$, $\xi_r \geq 0$; Q_{ir} 为地区 r 政府储备库物资储备量; Q_{jr} 为地区 r 实物储备企业物资储备量; Q_{kr} 为地区 r 生产能力储备企业物资储备量; c_{ir} 为地区政府储备库单位物资的采购储备成本; o_{jr} 为地区 r 实物储备企业物资的单位期权预留价格; o_{kr} 为地区 r 生产能力储备企业物资的单位期权预留价格; p 为投机行为被发现的概率; ε 为政府对企业投机行为的惩罚系数; ω_{jr} 为地区 r 实物储备企业投机行为物资比例; ω_{kr} 为地区 r 生产能力储备企业投机行为物资比例; v 为未使用物资单位残值; e_{jr} 为地区 r 实物储备企业物资的单位期权执行价格; e_{kr} 为地区 r 生产能力储备企业物资的单位期权执行价格; c_r 为灾害发生后, 地区 r 现货市场上单位物资的采购成本; D 为灾害损失; δ_1 为物资总储备满足需要时的灾害损失系数; δ_2 为物资总储备未满足需要时的灾害损失系数; E 为期望算子。

式(1)表示政府成本最低, 其中第一项为政府储备库采购储备物资的成本, 第二项为实物储备企业的期权预留成本和惩罚其投机行为收益, 第三项为生产能力储备企业期权预留成本和惩罚其投机行为收益, 第四项为政府储备库未使用物资残值收益, 第五六项分别为政府储备库、实物储备企业、生产能力储备企业的期权执行成本, 第七项为物资储备总量不足时的期货市场采购成本。式(2)表示灾害损失最小, $\delta_1 \leq \delta_2$ 。

1.2.2 约束条件

a. 储备能力约束:

$$Q_{ir} \leq W_{ir}^+ \quad Q_{jr} \leq W_{jr}^+ \quad Q_{kr} \leq W_{kr}^+ \quad (3)$$

$$Q_{ir} \geq 0 \quad Q_{jr} \geq 0 \quad Q_{kr} \geq 0 \quad (4)$$

式中: W_{ir}^+ 为地区 r 政府储备库最大储备量; W_{jr}^+ 为地区 r 实物储备企业最大储备量; W_{kr}^+ 为地区 r 生产能力储备企业最大储备量。

式(3)表示各主体物资储备量小于该主体最大物资储备量; 式(4)表示非负约束。

b. 政府成本约束:

$$C \leq M \quad (5)$$

式中 M 为政府资金预算。式(5)表示总成本不超过政府资金预算;

c. 企业利润约束:

$$\begin{aligned} \Pi_{jr} = & -c_{jr} Q_{jr} + o_{jr} Q_{jr} + (1-p) \omega_{jr} \psi_{jr} Q_{jr} - p \varepsilon \omega_{jr} Q_{jr} + E \{ e_{jr} \min[(\xi_r - Q_{ir})^+, Q_{jr}] \} + \\ & E \{ v[(Q_{jr} + Q_{ir} - \xi_r)^+ - (Q_{ir} - \xi_r)^+] \} \geq \bar{\Pi}_{jr} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Pi_{kr} = -h_{kr} Q_{kr} + o_{kr} Q_{kr} + (1-p) \omega_{kr} \psi_{kr} Q_{kr} - p \varepsilon \omega_{kr} Q_{kr} + E \{ (e_{kr} - c_{kr}) \min[(\xi_r - Q_{ir} - Q_{jr})^+, Q_{kr}] \} \geq \bar{\Pi}_{kr} \quad (7)$$

式中: c_{jr} 为地区 r 实物储备企业物资的单位生产储备成本; ψ_{jr} 为地区 r 实物储备企业的单位物资投机收益; $\bar{\Pi}_{jr}$ 为地区 r 实物储备企业最小收益; h_{kr} 为地区 r 生产能力储备企业维持单位物资生产能力的成本; ψ_{kr} 为地区 r 生产能力储备企业的单位物资投机收益; c_{kr} 为地区 r 生产能力储备企业物资的单位生产成本; $\bar{\Pi}_{kr}$ 为地区 r 生产能力储备企业最小收益。

式(6)表示实物储备企业利润大于最低值, 其中, 第一项为实物储备企业生产和储存物资的成本, 第二项为灾害发生前期权预留收益, 第三四项为投机行为收益, 第五项为发生灾害时该企业期权收益, 第六项为合同到期后该企业剩余物资残值。式(7)表示生产能力储备企业利润大于最低值, 其中, 第一项为生产能力储备企业维持物资生产能力的成本, 第二项为灾害发生前的期权预留收益, 第三四项为投机行为收益, 第五项为发生灾害时期权执行收益与企业生产物资的成本。

1.3 模型求解

引入参数 $\lambda (\lambda \geq 0)$ 将上述模型转化为 $C + \lambda D$ 的单目标问题。计算 $C + \lambda D$ 对 Q_{ir} 、 Q_{jr} 、 Q_{kr} 的二阶导数,证明该函数是凸函数,满足最优性条件。因此,采用 KKT(karush-kuhn-tucker) 条件求解该模型^[19-21]。因为企业利润约束的计算十分复杂,将有无企业利润约束分为两种情况讨论。

1.3.1 不考虑企业利润约束模型求解

首先,先让 $C + \lambda D$ 对 Q_{ir}^* 、 Q_{jr}^* 、 Q_{kr}^* 的一阶导数为 0, 求出该模型的无储备能力约束最优解 Q_{ir}^* 、 Q_{jr}^* 、 Q_{kr}^* 。之后,考虑有储备能力约束的最优解,该模型解的形式为

$$\tilde{Q}_{ir} = \begin{cases} 0 & Q_{ir}^* \leq 0 \\ Q_{ir}^* & 0 < Q_{ir}^* < W_{ir}^+ \\ W_{ir}^+ & Q_{ir}^* \geq W_{ir}^+ \end{cases} \tag{8}$$

$$\tilde{Q}_{jr} = \begin{cases} 0 & Q_{jr}^* \leq 0 \\ Q_{jr}^* & 0 < Q_{jr}^* < W_{jr}^+ \\ W_{jr}^+ & Q_{jr}^* \geq W_{jr}^+ \end{cases} \tag{9}$$

$$\tilde{Q}_{kr} = \begin{cases} 0 & Q_{kr}^* \leq 0 \\ Q_{kr}^* & 0 < Q_{kr}^* < W_{kr}^+ \\ W_{kr}^+ & Q_{kr}^* \geq W_{kr}^+ \end{cases} \tag{10}$$

考虑非负约束时,三主体混合储备模式将可能转变为其他储备模式。用下标 1、2、3、4、5、6、7 表示仅有政府直接储备、仅有企业实物储备、仅有企业生产能力储备、政府与实物储备企业混合储备、政府与生产能力储备企业混合储备、实物储备企业与生产能力储备企业混合储备、三主体混合储备这 7 种储备模式。

1.3.2 考虑企业利润约束模型求解

令待定参数 $\alpha_{1r} \geq 0, \alpha_{2r} \geq 0, \alpha_{3r} \geq 0, \beta_{1r} \geq 0, \beta_{2r} \geq 0, \beta_{3r} \geq 0, \gamma_{jr} \geq 0, \gamma_{kr} \geq 0$, 构造函数如下:

$$\begin{aligned} L(Q, \alpha, \beta, \gamma) = & C + \lambda D + \sum_r \alpha_{1r} (Q_{ir} - W_{ir}^+) + \sum_r \alpha_{2r} (Q_{jr} - W_{jr}^+) + \\ & \sum_r \alpha_{3r} (Q_{kr} - W_{kr}^+) + \sum_r \beta_{1r} (-Q_{ir}) + \sum_r \beta_{2r} (-Q_{jr}) + \\ & \sum_r \beta_{3r} (-Q_{kr}) + \sum_r \gamma_{1r} (\bar{\Pi}_{jr} - \Pi_{jr}) + \sum_r \gamma_{2r} (\bar{\Pi}_{kr} - \Pi_{kr}) \end{aligned} \tag{11}$$

对于给定的 γ_{1r}, γ_{2r} , 求出无储备能力约束最优解 $Q_{ir, \gamma_{1r}, \gamma_{2r}}, Q_{jr, \gamma_{1r}, \gamma_{2r}}$ 和 $Q_{kr, \gamma_{1r}, \gamma_{2r}}$ 。有储备能力约束最优解的表现形式与 1.3.1 类似, 不再赘述。为了简化函数表达式, 用 m_{jr}, m_{kr} 分别表示 $-c_{jr} + o_{jr} + (1-p)\omega_{jr}\psi_{jr} - p\varepsilon\omega_{jr} + e_{jr} - h_{kr} + o_{kr} + (1-p)\omega_{kr}\psi_{kr} - p\varepsilon\omega_{kr} + e_{kr} - c_{kr}$:

$$Q_{ir, \gamma_{1r}, \gamma_{2r}} = F^{-1} \left(\frac{o_{jr} - p\varepsilon\omega_{jr} + e_{jr} - c_{ir} - \gamma_{1r}m_{jr}}{e_{jr} - v + \gamma_{1r}v} \right) \tag{12}$$

$$\begin{aligned} Q_{jr, \gamma_{1r}, \gamma_{2r}} = & F^{-1} \left(\frac{o_{kr} - p\varepsilon\omega_{kr} + e_{kr} - \gamma_{2r}m_{kr} - o_{jr} + p\varepsilon\omega_{jr} - e_{jr} + \gamma_{1r}m_{jr}}{e_{kr} - e_{jr} - \gamma_{1r}v + \gamma_{1r}e_{jr}} \right) - \\ & F^{-1} \left(\frac{o_{jr} - p\varepsilon\omega_{jr} + e_{jr} - \gamma_{1r}m_{jr} - c_{ir}}{e_{jr} - v + \gamma_{1r}v} \right) \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} Q_{kr, \gamma_{1r}, \gamma_{2r}} = & F^{-1} \left(\frac{c_r - o_{kr} + p\varepsilon\omega_{kr} - e_{kr} - \lambda\delta_1 + \lambda\delta_2 + \gamma_{2r}m_{kr}}{c_r - e_{kr} + \lambda\delta_2 - \lambda\delta_1 - \gamma_{2r}c_{kr} + \gamma_{2r}e_{kr}} \right) - \\ & F^{-1} \left(\frac{o_{kr} - p\varepsilon\omega_{kr} + e_{kr} - \gamma_{2r}m_{kr} - o_{jr} + p\varepsilon\omega_{jr} - e_{jr} + \gamma_{1r}m_{jr}}{e_{kr} - e_{jr} - \gamma_{1r}v + \gamma_{1r}e_{jr}} \right) \end{aligned} \tag{14}$$

针对 $\gamma_{1r} \geq 0, \gamma_{2r} \geq 0$, 可以分类讨论(以 γ_{1r} 为例, γ_{2r} 情况类似): ①当 $\gamma_{1r} = 0$ 时, $U_{jr} - \Pi_{jr} \leq 0$, 即该约束可以忽略; ②当 $\gamma_{1r} \geq 0$ 时, $U_{jr} - \Pi_{jr} = 0$, 即当企业利润不满足时, 需要调整模型的解, 同时, 企业利润还应恰好达到临界值。这 8 个待定参数分别对应 8 个约束条件, 待定参数的值由约束条件的满足情况确定。当约束条件满足时, 对应参数为 0; 当约束条件不满足时, 对应参数大于 0。待定参数的求解步骤如下。

步骤 1 确定参数 λ 。

步骤2 确定适用储备模式。

步骤3 选择储备主体数量较多的模式,如果为三主体混合储备模式,则计算出最优储备量,如果储备主体数量相同,则通过目标函数最小得出最优储备量,确定 $\beta_{1r}, \beta_{2r}, \beta_{3r}$ 的值。

步骤4 考虑储备能力约束,如果满足,则进行下一步,如果不满足,则该主体储备量为最大储备能力,确定 $\alpha_{1r}, \alpha_{2r}, \alpha_{3r}$ 的值。

步骤5 考虑企业利润约束,如果满足,则进行下一步,如果不满足,将企业利润约束变为等式,联立确定 γ_{1r}, γ_{2r} 的值,并计算出储备量最优值。因较为复杂,常采用算法求解。

步骤6 考虑政府成本约束,如果满足,得到最优解,如果不满足,无解。

通过上述求解流程可知,当考虑企业利润约束,三主体混合储备模式问题属于非线性不可分背包问题,难以求出数值最优解,往往需要用到算法。由于该模式的适用范围十分复杂且苛刻,所以常常需要其他的简化模式。

2 数值计算与敏感度分析

2.1 数值计算

采用通用性、急需性、需求量等属性描述物资^[22],其中以块石为代表的洪涝灾害应急物资具有通用性很高、急需程度很高、需求量很大等属性。因块石往往需要政府专门建造块石基地储备,是政府储备防汛物资无法忽略的一类物资,故选取块石作为算例计算。通过调研得到该类物资的平均需求量、现货市场采购成本、政府储备库最大储备能力、政府储备预算。根据表1中三主体混合储备模式的要求及其属性,进行了合理的假设以确定其他参数。

表1 以块石为代表的洪涝灾害应急物资参数
Table 1 Parameters of flood control emergency materials represented by block stone

<i>r</i>	<i>c_{ir}</i>	<i>e_{jr}</i>	<i>e_{kr}</i>	<i>c_r</i>	<i>u_r</i>	λ	δ_1	δ_2
1	50	22	40	100	600	0.10	30	80
2	51	23	41	99	601	0.15	31	81
3	52	24	42	98	603	0.14	31	80
4	53	25	43	98	605	0.15	32	81
5	49	21	39	101	605	0.15	29	79
6	48	20	38	101	602	0.13	28	78

注: u_r 为地区*r*的平均物资需求量。

算例基准参数如下: $\xi_1 \sim N(600, 100)$, $c_{i1} = 50$, $v = 10$, $p = 0.4$, $\varepsilon = 45$, $\omega_{j1} = 0.1$, $\omega_{k1} = 0.1$, $o_{j1} = 30$, $o_{k1} = 15$, $e_{j1} = 22$, $e_{k1} = 40$, $c_1 = 100$, $\lambda = 0.1$, $\delta_1 = 30$, $\delta_2 = 80$, $c_{j1} = 40$, $\psi_{j1} = 20$, $h_{k1} = 10$, $c_{k1} = 30$, $\psi_{k1} = 20$, $W_{ir} = 700$, $W_{jr} = 400$, $W_{kr} = 400$, $\overline{\Pi}_{jr} = 1000$, $\overline{\Pi}_{kr} = 1\,000$, $M = 60\,000$ 。假设政府将地区分为6块,各地区参数均根据基准数据调整而来。表1为主要参数,未列出参数与基准参数相同。使用算法在MATLAB中得到最优解,运行结果见表2、表3,表中 Φ_{ir}^* 、 Φ_{jr}^* 、 Φ_{kr}^* 分别为地区*r*政府储备库、实物储备企业和生产能力储备企业物资最优储备占比。

表2 以块石为代表的洪涝灾害应急物资各储备模式下最优物资配置结构

Table 2 Optimal reserve structure of flood emergency materials represented by block stone under various applicable modes

<i>r</i>	Q_{ir}^*	Q_{jr}^*	Q_{kr}^*	Q_7^*	Q_{ir4}^*	Q_{jr4}^*	Q_4^*	Q_{ir1}^*	$\Phi_{ir7}^*/\%$	$\Phi_{jr7}^*/\%$	$\Phi_{kr7}^*/\%$
1	387	116	180	683	387	254	641	620	56.7	17.0	26.4
2	385	119	180	684	385	258	643	620	56.3	17.4	26.3
3	384	122	177	683	384	258	642	617	56.2	17.9	25.9
4	383	125	177	685	383	260	643	617	55.9	18.2	25.8
5	396	113	185	694	396	255	651	631	57.1	16.3	26.7
6	397	109	185	691	397	252	649	630	57.5	15.8	26.8
总	2 332	704	1 084	4 120	2 332	1 537	3 869	3 735	56.6	17.1	26.3

由表2、表3可见,以块石为代表的洪涝灾害应急物资在三主体混合储备模式下有以下储备特点:

a. 每个地区的总储备量大于其他储备模式,同时,双主体储备模式相较单主体也存在同样优势。

b. 每个地区目标函数、政府成本、灾害损失均低于其他储备模式,说明了模型的有效性。同时,发现每个地区双主体储备模式的目标函数、政府成本、灾害损失也低于单主体储备。

c. 最优物资配置结构往往是政府储备库占比过半数,而生产能力储备企业占比略大于实物储备企业。对比各地区的最优物资配置结构,可以得到参数的小幅度变动不会明显改变该类型物资最优储备结构的结论。

表 3 以块石为代表的洪涝灾害应急物资各储备模式下政府成本及灾害损失率

Table 3 Government cost and disaster loss rate under various reserve modes of flood emergency materials represented by block stone

r	$(C+\lambda D)_7$	C_7	D_7	$(C+\lambda D)_4$	C_4	D_4	$(C+\lambda D)_1$	C_1	D_1
1	34 136	32 279	18 569	34 890	32 977	19 130	35 515	33 562	19 536
2	35 788	32 909	19 195	36 548	33 585	19 751	37 227	34 199	20 188
3	36 285	33 587	19 275	37 015	34 237	19 841	37 718	34 874	20 315
4	37 276	34 283	19 948	37 999	34 922	20 519	38 744	35 590	21 028
5	34 661	31 951	18 068	35 464	32 675	18 595	36 072	33 230	18 949
6	33 471	31 212	17 379	34 274	31 946	17 906	34 827	32 458	18 228
总	211 617	196 221	112 434	216 190	200 342	115 742	220 103	203 913	118 244

研究表明,三主体混合储备模式既可以提高物资保障能力,又可以降低政府花费与灾害损失。

2.2 敏感度分析

基于基准数据,在三主体混合储备模式适用范围内通过控制变量的方法对政府决策中的成本参数进行敏感度分析。

成本参数包括两部分,一部分为政府成本参数,包括储备库采购储存成本 c_{ir} ,现货市场采购成本 c_r ,实物或生产能力储备企业的期权价格 $o_{jr}, o_{kr}, e_{jr}, e_{kr}$;另一部分为企业成本参数,包括实物储备企业采购生产储备成本 c_{jr} ,生产能力储备企业保持生产能力成本 h_{kr} 与生产能力储备企业生产成本 c_{kr} 。在政府决策时,因政府储备数量较大,企业往往不会拒绝合作,故只对政府成本参数做敏感度分析。

三主体混合储备模式下 $c_{ir}, c_r, e_{jr}, e_{kr}$ 对物资最优配置和目标函数的影响如图 1、图 2 所示。

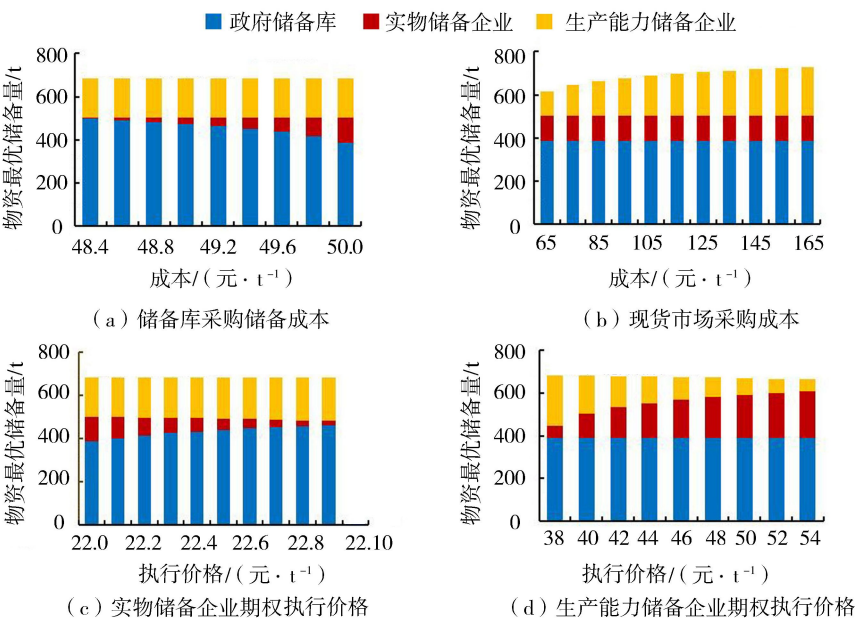


图 1 三主体混合储备模式下政府成本参数对最优物资配置结构的影响

Fig.1 Influence of government cost parameters on optimal reserve structure under three-agent mixed reserve mode

由图 1、图 2 可见:

a. 在 c_r 较小时,总储备量约 630 t,大于平均需求量。随着 c_r 增加,总储备量增加,呈凹性。对 c_{ir}, e_{jr}, e_{kr} 而言,当它们较小时,总储备量都在 630 t 左右,高于物资平均需求量(600 t);它们的增加不会对总储备量造成明显影响。

b. $c_{ir}, c_r, e_{jr}, e_{kr}$ 4 种成本参数对物资配置结构的影响各不相同。① c_{ir} 较小时,大部分为政府储备库,其他部分几乎全为生产能力储备企业。随着 c_{ir} 加大,政府储备库减少,呈凸性,实物储备企业增加,呈凸性,生产能力储备企业不变。② c_r 较小时,政府储备库占大部分,剩余部分由实物储备企业与生产能力储备企业平分。随着 c_r 增加,政府储备库与实物储备企业维持稳定,生产能力储备企业不断增加,呈凹性。③ e_{jr} 较小时,政府储备库占比刚过半数,相较实物储备企业,生产能力储备企业占比更多。随着 e_{jr} 增加,政府储备库增

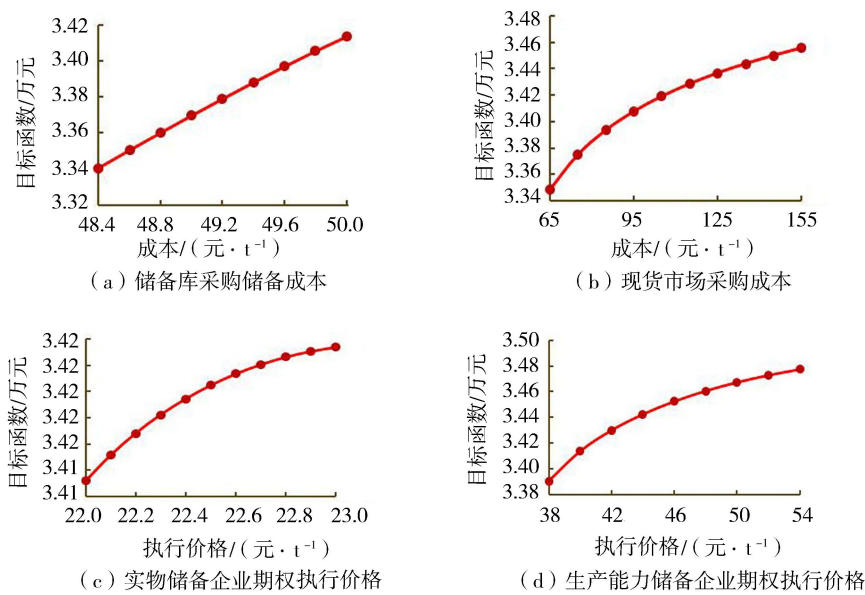


图2 三主体混合储备模式下政府成本参数对目标函数值的影响

Fig.2 Influence of government cost parameters on objective function value under three-agent mixed reserve mode

加,呈凹性,实物储备企业减少直至消失,呈凹性,生产能力储备企业不变。④ e_{kr} 较小时,政府储备库占比刚过半数,剩余大部分为生产能力储备企业。随着 e_{kr} 增加,政府储备库维持稳定,实物储备企业增加,呈凹性,生产能力储备企业减少直至消失,呈凹性。

c. 随着成本参数的增加,目标函数值均不断增加。 c_r 与目标函数值近似呈线性,而 c_{ir} 、 e_{jr} 、 e_{kr} 呈凹性。

3 结论与建议

3.1 结论

a. 仅从政府花费和灾害损失的方面考虑,对于以块石为代表的洪涝灾害应急物资建议采用以政府直接储备为主,委托企业储备为辅,社会力量代储备为补充的储备模式。以块石为代表的洪涝灾害应急物资的适用储备结构,政府储备库占比56.6%,实物储备企业占比17.1%,生产能力储备企业占比26.3%。

b. 洪涝灾害应急物资储备总量需考虑物资的现货市场采购成本。物资的需求量大,现货市场采购成本高,物资的储备总量就高,反之亦然。

c. 洪涝灾害应急物资储备结构主要需考虑政府储备库采购储存成本、实物或生产能力储备企业的期权执行价格。以政府储备库采购储存成本为标准,企业的期权执行价格相比较小时,该企业储备占比较大。

3.2 建议

a. 分地区、分物资确定不同洪涝灾害应急物资配置结构。不同地区、不同物资具有不同属性与特征,不可盲目采用同一种物资配置结构,主管部门应当为每个地区每种物资确定合适的储备主体及比例。

b. 建立政府与委托储备企业长期战略合作关系。在当前洪涝灾害应急物资储备体系中,政府与物资生产供应企业是建立在招投标制度上的临时采购关系,而委托储备企业不同,政府与其需保持数年甚至更长的合作关系。双方应建立长期战略合作关系,以避免储备体系整合困难,方便政府统筹调度。

c. 建立健全洪涝灾害应急物资储备管理体系。洪涝灾害应急物资储备体系中通常包含物资生产供应企业、物资主管部门、物资储备部门、物资委托储备企业等多个部门和企业。洪涝灾害应急物资储备管理体系需满足各部门和企业协调工作和运行效率的要求,以实现信息共享,确保洪涝灾害应急物资储备工作效能。

参考文献:

[1] 黎式. 河南全力迎战大暴雨[N]. 新华日报,2021-07-22(08).

[2] 黄津辉,段亭亭. 中国海绵城市开发与加拿大综合雨洪管理对比研究:以多伦多为例[J]. 水资源保护,2017,33(5):5-12. (HUANG Jinhui, DUAN Tingting. Comparative study on sponge city development in China and integrated stormwater management in Canada:a case study of Toronto[J]. Water Resources Protection,2017,33(5):5-12. (in Chinese))

[3] ZHANG Lin . Emergency supplies reserve allocation within government-private cooperation:a study from capacity and response perspectives[J]. Computers & Industrial Engineering,2021,154:1-20.

[4] 陈鸿起,解建仓,申毅荣,等. 防汛物资协同储备模型研究[J]. 系统工程理论与实践,2007,27(4):92-98. (CHEN Hongqi,XIE Jiancang,SHEN Yirong,et al. Research on the cooperative inventory models of flood prevention materials[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,2007,27(4): 92-98. (in Chinese))

[5] 廖朝轩,高爱国,黄恩浩. 国外雨水管理对我国海绵城市建设的启示[J]. 水资源保护,2016,32(1): 42-45. (LIAO Chaoxuan,GAO Aiguo,HUANG Enhao. Enlightenment of rainwater management in foreign countries to sponge city construction in China[J]. Water Resources Protection,2016,32(1):42-45. (in Chinese))

[6] 刘阳,田军,冯耕中,等. 供应商风险规避下基于期权契约的政企联合储备应急物资模型[J]. 运筹与管理,2020,29(11):102-111. (LIU Yang,TIAN Jun,FENG Gengzhong,et al. The model of joint relief supplies reserves of the government and a risk-averse supplier based on an option contract[J]. Operations Research and Management Science,2020,29(11):102-111. (in Chinese))

[7] GUO Ying,WOOD J,PAN Wei,et al. Inventory optimization of airport perishable emergency supplies with replacement strategy facing stochastic occurrence time by CVAR approach[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2018,31:170-183.

[8] 丁斌,雷秀,孙连禄. 应急物资储备方式选择与成本分摊问题[J]. 北京理工大学学报(社会科学版),2011,13(6): 73-78. (DING Bin,LEI Xiu,SUN Lianlu. Research on selecting storage manner and cost allocation for emergency materials[J]. Journal of Beijing Institute of Technology(Social Sciences Edition),2011,13(6):73-78. (in Chinese))

[9] 郭存芝,汤瑞凉,屠晓蕾,等. 综合性生产企业进货决策优化模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2000,28(5): 67-71. (GUO Cunzhi,TANG Ruiliang,TU Xiaolei,et al. A study on laying-in-stock strategy for integrated production enterprises [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2000,28(5):67-71. (in Chinese))

[10] WANG Xihui,LI Feng ,LIANG Liang,et al. Pre-purchasing with option contract and coordination in a relief supply chain[J]. International Journal of Production Economics,2015,167: 170-176.

[11] HU Zhongquan,TIAN Jun,FENG Gengzhong. A relief supplies purchasing model based on a put option contract[J]. Computers & Industrial Engineering,2019,127: 253-262.

[12] AGHAJANI M,TORABI S A,HEYDARI J. A novel option contract integrated with supplier selection and inventory prepositioning for humanitarian relief supply chains[J]. Socio-Economic Planning Sciences,2020,71:100780.

[13] EGAN M J. Private goods and services contracts: increased emergency response capacity or increased vulnerability [J]. International Journal of Production Economics,2010,126(1): 46-56.

[14] 陈敬贤,梁樑. 多产品救援物资的储备决策: 一个扩展的 Newsvendor 模型[J]. 中国管理科学,2018,26(6): 143-152. (CHEN Jingxian, LIANG Liang. Pre-positioning decisions of stockpiling multiple relief materials: an extended Newsvendor approach[J]. Chinese Journal of Management Science,2018,26(6):143-152. (in Chinese))

[15] 扈衷权,田军,王鹏,等. 政企联合储备模式下应急物资储备及采购定价研究[J]. 系统工程理论与实践,2020,40(12): 3181-3193. (HU Zhongquan,TIAN Jun,WANG Peng,et al. A research on emergency supplies reserve and purchase pricing under the mode of joint reserve of governments and enterprises[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,2020,40(12): 3181-3193. (in Chinese))

[16] SHAMSI G N,ALI T S,SHAKOURI G H. An option contract for vaccine procurement using the SIR epidemic model[J]. European Journal of Operational Research,2018,267(3): 1122-1140.

[17] LIU Yang,TIAN Jun,FENG Gengzhong,et al. A relief supplies purchasing model via option contracts [J]. Computers & Industrial Engineering,2019,137: 106009.

[18] 王茵,胡大伟. 不确定因素下基于多供应主体的应急物资供应模型[J]. 中国安全生产科学技术,2017,13(3):12-20. (WANG Yin,HU Dawei. Study on emergency material supply model based on multiple supply subjects under uncertain factors [J]. Journal of Safety Science and Technology,2017,13(3):12-20. (in Chinese))

[19] ZHANG Bin,HUA Zhongsheng. A portfolio approach to multi-product newsboy problem with budget constraint[J]. Computers & Industrial Engineering,2010,58(4): 759-765.

[20] BRETTHAUERA K M,SHETTY B. The nonlinear knapsack problem-algorithms and applications [J]. European Journal of Operational Research,2002,138(3):459-472.

[21] BRETTHAUERA K M, SHETTY B. The nonlinear resource allocation problem[J]. Operations Research, 1995, 43(4):670-683.

[22] 胡忠君,刘艳秋,李佳. 时间依赖下洪涝灾区紧急物资分配混合优化方法[J]. 控制与决策,2019,34(7): 1571-1576. (HU Zhongjun,LIU Yanqiu,LI Jia. A mixed optimization method of emergency material distribution in flood disaster area depending on time[J]. Control and Decision,2019,34(7):1571-1576. (in Chinese))